ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья
УДК 621.873.2:614.8
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-41-47



Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов

А. А. Короткий[1], А. Н. Павленко[1], Э. А. Панфилова[1], Д. Н. Симонов[2]
[1]Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2] ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (Новочеркасск, Российская Федерация)

Введение. В статье представлен анализ аварий грузоподъемных кранов, причинами которых являются разрушения несущих соединений конструкций в период назначенного срока службы, вызванные конструктивными и технологическими недостатками, при эксплуатационных нагрузках, не превышающих паспортные характеристики.
Постановка задачи. Задачей исследования является анализ причин аварий разнотипных грузоподъемных кранов и особенностей, объединяющих эти аварии.
Теоретическая часть. Обзор статистических данных по авариям на грузоподъемных кранах показал, что разрушения несущих конструкций происходят не только вследствие усталостной прочности при длительной эксплуатации, но и недостаточной несущей способности конструкции шарнирных соединений, нарушений технологических процессов сварки элементов конструкций в условиях, не превышающих паспортные характеристики в период гарантийного срок службы.
Выводы. Установлено, что разрушения происходят в расчетных элементах металлоконструкций, связанных с ходовой частью кранов, при относительно высоком уровне действующих напряжений и незначительных циклах нагружения, что свидетельствует об ошибках при конструировании и нарушениях технологических процессов сварки при их изготовлении.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, элемент конструкций грузоподъемного крана, безопасность, авария.

Для цитирования: Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 1. — С. 41−47. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-41-47

Original article

Questions of safety of load-lifting cranes structural connections

A. A. Korotkiy[1], A. N. Pavlenko[1], E. A. Panfilova[1], D. N. Simonov[2]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] LLC Engineering and Consulting Center "Mysl" NSTU (Novocherkassk, Russian Federation)

Introduction. The article presents an analysis of accidents of lifting cranes, the causes of which are the destruction of load-bearing structural connections during the designated service life, caused by structural and technological deficiencies, with operational loads not exceeding the passport specifications.
Problem Statement. The objective of the study is to analyze the causes of accidents of different types of lifting cranes and the features that connect these accidents.
Theoretical Part. A review of statistical data on accidents on lifting cranes has shown that the destruction of load-bearing structures occurs not only due to fatigue strength during long-term operation, but also due to insufficient bearing capacity of the hinge joints, violations of technological processes of structural elements welding in conditions not exceeding the passport specifications during the service life.

Conclusions. It is established that the destruction occurs in the design elements of metal structures associated with the crane mounting at a relatively high level of operating stresses and insignificant loading cycles, which indicates errors in the design and violations of welding processes during their manufacture.

Key words: lifting crane, structural element of a lifting crane, safety, accident.

For citation: Korotkiy A. A., Pavlenko A. N., Panfilova E. A., Simonov D. N. Questions of safety of load-lifting cranes structural connections. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2022;1: 41−47. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-41-47

Введение. Согласно сведениям Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в настоящее время на территории РФ зарегистрировано более 200 тыс. грузоподъемных кранов из которых более 64 % отработали нормативный срок службы [1].

Известно, что эксплуатация грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы, в большей степени связана с авариями, вследствие усталостных разрушений несущих конструкций. Более опасные случаи аварий происходят на объектах в период назначенного срока службы при нагрузках, не превышающих паспортные характеристики, из-за недостаточной несущей способности конструкций шарнирных соединений либо недостаточной прочности сварных соединений элементов конструкций.

Постановка задачи. Анализ эксплуатации грузоподъемных кранов показывает, что имеются случаи аварий на объектах, которые не отработали и половины нормативного срока службы, назначенного заводом-изготовителем [2, 3]. Проанализируем причины аварий разнотипных грузоподъемных кранов и определим объединяющие эти аварии особенности.

Теоретическая часть. Рассмотрим примеры аварий, связанные с разрушением расчетных элементов конструкций грузоподъемных кранов.

Пример №1. Авария на мостовом кране грузоподъемностью 10/10 т. Назначенный срок службы крана при работе в паспортном режиме — 10 лет, гарантийный срок эксплуатации — 24 месяца, наработка крана на момент аварии — не более А4 при паспортном значении А7.

После года эксплуатации мостового крана во время движения крана при выполнении технологических операций с порожним грейфером произошло разрушение сварных соединений стенок модуля холостого колеса с вертикальным листом металлоконструкции концевой балки со стороны питающих троллей (рис. 1). Произведен ремонтно-восстановительный ремонт. Эксплуатация была продолжена.



Рис. 1. Разрушение сварных швов по границе металла сплавления соединения модуля холостого колеса с вертикальным листом концевой балки

Еще через год произошло полное разрушение двух узлов во время движения крана при выполнении технологических операций:

— сварного соединения стенок модуля холостого колеса с вертикальным листом металлоконструкции концевой балки со стороны кабины управления, при этом модуль колеса упал в пролет цеха (рис. 2);

— сварных соединений элементов концевой балки (поясов и стенок) с вертикальным листом модуля холостого колеса со стороны питающих троллей, при этом модуль колеса удержался на рельсовом пути (рис. 3).

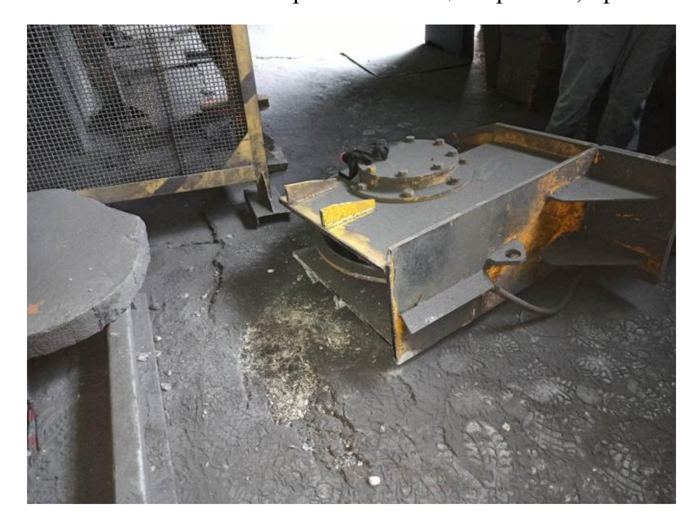


Рис. 2. Полное разрушение сварных соединений по границе металла сплавления стенок модуля холостого колеса с вертикальным листом концевой балки со стороны кабины крановщика

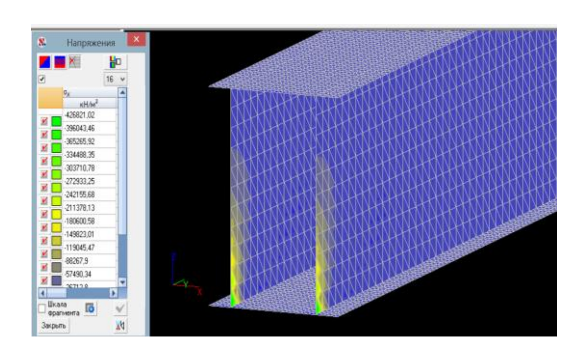


Рис. 3. Полное разрушение сварных соединений по границе металла сплавления стенок модуля холостого колеса с вертикальным листом концевой балки со стороны троллей

Все вышеуказанные разрушения сварных швов произошли по границе металла сплавления элементов «элементы модуля — вертикальный лист» и «элементы концевой балки — вертикальный лист». Разрушений сварных швов по металлу шва не зафиксировано.

Установление обстоятельств аварий показало, что режим работы и условия эксплуатации крана не превышали паспортные значения, а состояние подкрановых путей соответствовало требованиям ФНП [4].

Проверочным расчетом на прочность концевой балки крана с использованием интегрированной системы анализа конструкций «STRUCTURE CAD» было подтверждено (рис. 4), что примененные материалы и толщины металла концевых балок соответствуют его грузоподъемности и действующим нагрузкам [5].



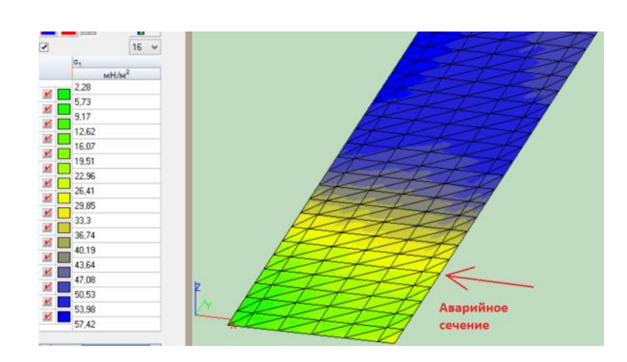


Рис. 4 Расчетная модель концевой балки крана

Расследование причин аварии крана показало, что разрушение концевых балок происходило вследствие недостаточной конструктивной прочности (несущей способности) сварных швов соединений элементов модулей холостых колес и элементов концевых балок с вертикальным листом, а именно:

— сварные соединения были выполнены без разделки кромок швом Т1 ГОСТ 14 771–76 [6], что не соответствует типу сварного шва, указанного в паспорте крана (указан Т6 ГОСТ 14771–76 с разделкой кромок);

— фактические катет, высота и площадь сечения разрушенных сварных соединений, выполненных швом типа Т1, не обеспечивали необходимую прочность соединений;

— фактическое отсутствие зазора (менее 0,2 мм) между свариваемыми элементами соединений (при допустимом значении 1,5–2 мм) препятствовало качественному проплавлению сварного соединения;

— геометрические параметры разрушенных сварочных швов элементов концевой балки не соответствовали требованиям норм проектирования по ГОСТ 14 771–76 и РД 36–62–00 [7].

Причиной аварии следует считать нарушение сварочных технологий при изготовлении металлоконструкции концевой балки мостового крана.

Пример №2. Авария портального крана грузоподъемностью 20 т. Назначенный заводом-изготовителем срок службы при работе в паспортном режиме — 20 лет или 50 000 моточасов.

При эксплуатации портального крана произошло усталостное разрушение двух осей крепления балансирных тележек.

На момент аварии кран имел следующие эксплуатационные параметры:

— наработка крана за срок эксплуатации — 25 000 моточасов;

— масса перегруженного материала — 2,2 млн. тонн;

— количество циклов работы — 220 000.

Анализ обстоятельств аварий показал, что рабочие поверхности всех 16-ти ходовых колес имеют характерный износ поверхности катания (рис. 5) в виде «наката» высотой 3–4 мм. Реборды колес контактируют с внутренней стороной головки рельса из-за перемещения крана по криволинейным участкам пути.





Рис. 5 Износ рабочих поверхностей ходовых колес

По результатам планово-высотной выверки участка рельсового пути, на котором произошла авария, установлено сужение колеи выше допустимого значения.

Оси колесных тележек изготовлены из поковки стали 40ХФА ГОСТ 4 543–71 [8]. Сталь марки 40ХФА [9, 10] — легированная термообрабатываемая, имеет низкую свариваемость из-за высокой трещиночувствительности.

Разрушение осей колесных тележек произошло в зоне перехода диаметров оси от ∅ 150 мм к ∅ 230 мм. Этот участок оси характеризуется повышенным эффективным коэффициентом концентрации напряжений при циклических переменных нагрузках не ниже $K_\sigma = 2{,}5$ [11, 12].

На поверхности излома осей были обнаружены следы коррозии, что свидетельствует о наличии застарелой трещины площадью около 50 % от площади оси балансира. Поверхности излома (рис. 6, 7) имеют характерные зоны, указывающие на усталостное разрушение металла, возникающее вследствие воздействия переменных циклических напряжений (рис. 8) [12, 13]:

— 1 – зона зарождения усталостной трещины, расположена на боковой поверхности оси в наиболее нагруженной ее части;

— 2 – зона развития усталостной трещины, обладает гладкой (притертой) поверхностью;

— 3 – зона «долома», имеет крупнозернистое волокнистое строение поверхности, указывающее на направление разрушения (рис. 9).



Рис. 6. Поверхности излома оси №1



Рис. 7. Поверхность излома оси №2



Рис. 8. Усталостное разрушение с характерными зонами

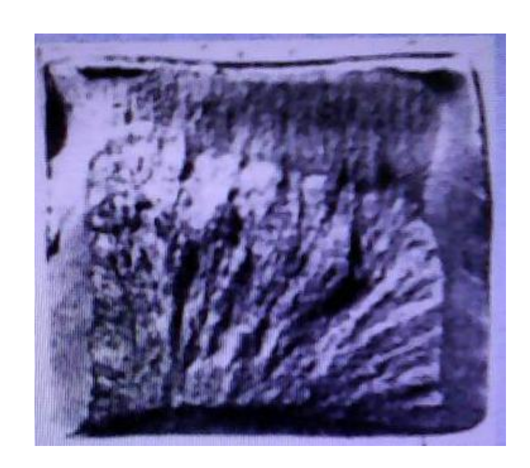
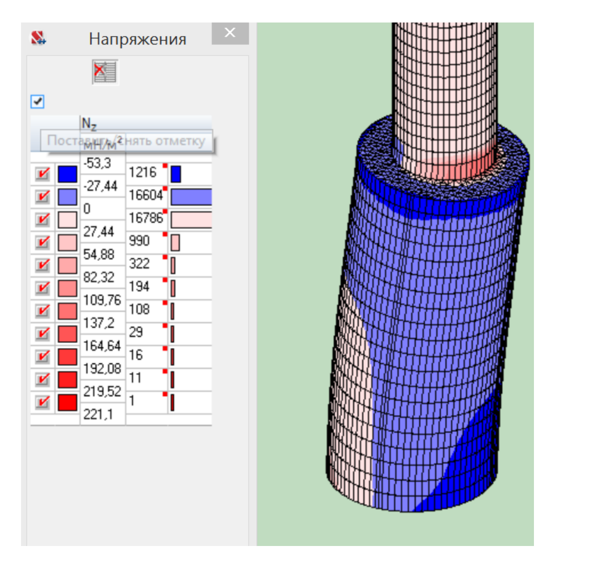


Рис. 9. Волокнистое строение «долома»

Расчеты, выполненные с использованием интегрированной системы анализа конструкций «STRUCTURE CAD» (рис. 10) показали, что сочетание нагрузок при работе крана на криволинейном участке пути является повреждающим и условие длительной прочности не выполняется.



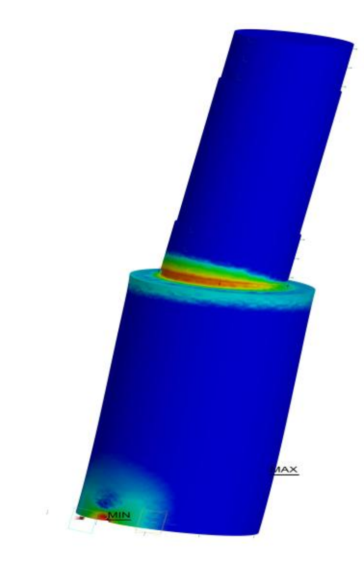


Рис. 10 Деформации и напряжения в оси колесной тележки

Выполненные расчеты на статическую и усталостную прочность оси балансирной тележки показали, что:

1. Статическое нагрузки с учетом массы грейфера с грузом на максимальном вылете в сечении резкого перехода диаметра оси тележки не является повреждающим, т.к. расчетное напряжение значительно ниже допускаемого.

2. При эксплуатации крана на криволинейном участке рельсового пути на портал крана передается горизонтальная составляющая усилия от поворотной части крана и реакция от взаимодействия ходового колеса с рельсом. Вышеуказанное сочетание нагрузок является повреждающим, что приводит к зарождению и последующему развитию усталостных трещин в опасном сечении осей.

Причиной аварии и преждевременного разрушения оси балансирной тележки является ошибка при конструировании изделия сложной формы, имеющего переходной участок с высоким эффективным концентратором напряжений.

Выводы. Вышеописанные аварии грузоподъемных кранов, не отработавших и половины нормативного срока службы, объединяют следующие особенности:

— краны относятся к группе классификации (режима) по ИСО 4301/1 – А7;

— разрушения происходят в расчетных элементах металлоконструкций, связанных с ходовой частью кранов, воспринимающих нагрузки от собственного веса крана, перемещаемого грузы и реакции от подкранового рельса;

— напряженное состояние характеризуется относительно высоким уровнем действующих напряжений и количеством циклов менее $N = 10^5$.

Библиографический список

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году / gosnadzor.ru : [сайт]. — URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения : 13.01.2022).

2. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (редакция от 11 июня 2021 года) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» / КонсультантПлюс // consultant.ru : [сайт]. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения : 15.01.2022).

3. ГОСТ 33709.1-2015. Межгосударственный стандарт. Краны грузоподъемные. Словарь. Часть 1. Общие положения / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135709?marker=7D20K3 (дата обращения : 15.01.2022).

4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» / Судебные и нормативные акты РФ // sudact.ru : [сайт]. — URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-26112020-n-461-ob/federalnye-normy-i-pravila-v/ (дата обращения : 16.01.2022).

5. ScadSoft / scadsoft.com : [сайт]. — URL: https://scadsoft.com/products/scad (дата обращения : 16.01.2022).

6. ГОСТ 14 771-76 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200004932 (дата обращения : 17.01.2022).

7. РД 36–62–00 «Оборудование грузоподъемное. Общие технические требования» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200022810 (дата обращения : 17.01.2022).

8. ГОСТ 4 543–71 «Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200005485 (дата обращения : 15.01.2022).

9. Марочник стали и сплавов // splav-kharkov.com : [сайт]. — URL: http://splav-kharkov.com/z_mat_start.php?zname_id=3050 (дата обращения : 17.01.2022).

10. Сталь 42CrMo4: характеристики, расшифровка, химический состав / Metal.place // metal.place : [сайт]. — URL: https://metal.place/ru/wiki/42crmo4/ (дата обращения : 18.01.2022).

11. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В. В. Москвичев, Н. А. Махутов, Ю. И. Шокин [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с. 10.7868/978-5-02-038832-1

12. Смирнов, А. Н. Разрушение и диагностика металлов / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, Н. В. Абабков. — Москва : Инновационное машиностроение; Кемерово: Сибирская изд. группа, 2016. — 479 с.

13. Горицкий, В. М. Диагностика металлов / В. М. Горицкий. — Москва: Металлургиздат, 2004. — 402 с.

Поступила в редакцию 19.01.2022
Поступила после рецензирования 02.02.2022
Принята к публикации 03.02.2022

Об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, korot@novoch.ru

Павленко Андрей Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, anpavlenko@rambler.ru

Панфилова Эльвира Анатольевна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат философских наук, доцент, ORCID, kotorkaya_elvira@mail.ru

Симонов Дмитрий Николаевич, главный конструктор ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Троицкая, 88), simonov@ikc-mysl.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов; А. Н. Павленко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста; Э. А. Панфилова — доработка текста, подготовка выводов; Д. Н. Симонов — проведение расчетов, формирование выводов.